

Аналогичные угловые зависимости были получены и проанализированы для образцов Ta(5нм)/Ru(5нм)/FeMn(t)/Ru(40нм)/Ta(5нм). В области толщин  $t$  от 0 до 4 нм наблюдалось повышение  $H_c$ , при этом одноосный характер магнитной анизотропии сохранялся (рис. 1, а). Смещение петли гистерезиса вдоль оси магнитного поля появляется лишь для  $t = 5$  нм, одновременно с этим наблюдается максимальное значение коэрцитивной силы. Интересно отметить, что для минимальной толщины антиферромагнитного слоя, при которой появляется обменное смещение, наблюдается изменение направления оси наведенной анизотропии на угол порядка  $30^\circ$  (рис. 1, б). Дальнейшее повышение  $t$  сопровождается выходом на насыщение поля обменного смещения и снижением коэрцитивной силы, максимумы угловой зависимости  $H_c$  и  $H_e$  практически совпадают и соответствуют направлению технологического поля, приложенного во время осаждения образца (рис. 1, с).

В целом полученные зависимости  $H_c$  и  $H_e$  от толщины антиферромагнитного слоя являются типичными для обменно-связанных систем типа ферромагнетик/антиферромагнетик. Угловые зависимости коэрцитивной силы и поля обменного смещения в переходной области толщин FeMn показали появление разориентации оси наведенной магнитной анизотропии и направления однонаправленной анизотропии. При этом направление однонаправленной анизотропии совпадало с направлением технологического поля, тогда как отклонение оси анизотропии составляло до  $30^\circ$ . По аналогии с [3], такая ситуация может являться следствием влияния осаждаемого слоя антиферромагнитного материала на ферромагнитный слой с низкой магнитной анизотропией, а возникающая фрустрация намагниченности транслируется через тонкий антиферромагнитный слой в рабочий слой Ru. При повышении толщины FeMn влияние нижнего слоя Ru снижается, и ось анизотропии становится параллельна технологическому полю и однонаправленной анизотропии. В результате работы можно заключить, что использование магнитомягкого подслоя может приводить к магнитным фрустрациям в интерфейсной области, как следствие, оказывать существенное влияние на перемагничивание рабочего слоя. Такое влияние может быть минимизировано путем увеличения толщины антиферромагнитного слоя, проведением дополнительной термомагнитной обработки, или использования подслоя с более сильной одноосной анизотропией.

Список публикаций:

[1] J. Nogues, I.K. Schuller *Exchange bias* // *J. Magn. Magn. Mater.* 1998

[2] McCord J., Schäfer R. *Domain wall asymmetries in Ni81Fe19/NiO: proof of variable anisotropies in exchange bias systems* // *New J. Phys.* 2009

[3] E. Jiménez, J. Camarero etc. *Emergence of noncollinear anisotropies from interfacial magnetic frustration in exchange-bias systems* // *Phys. Rev. B.* 2009

## **Влияние скорости охлаждения при термообработке на распределение намагниченности и максимальную магнитную проницаемость аморфного сплава Co-Fe-Ni-Cr-Si-B**

**Денисов Никита Денисович**

*Чекис Владимир Игоревич, Скулкина Надежда Александровна*

*Уральский федеральный университет им. Б.Н. Ельцина*

*Скулкина Надежда Александровна, д.ф.-м.н.*

*[frt\\_skoul@mail.ru](mailto:frt_skoul@mail.ru)*

Аморфные магнитомягкие сплавы на основе кобальта находят применение в магнитном экранировании, поскольку обладают высокими значениями магнитной проницаемости и близкой к нулю магнитострикцией насыщения. Стандартным приемом повышения уровня магнитных свойств являются термические обработки (ТО), которые вследствие сравнительно низкой температуры изотермической выдержки преимущественно проводят на воздухе без видимого окисления поверхности ленты. Физическими причинами, влияющими на распределение намагниченности и формирование уровня магнитных свойств, являются релаксация внутренних напряжений и индуцирование преимущественно плоских анизотропных растягивающих напряжений, обусловленных внедренными в поверхность ленты атомами водорода и кислорода при ее взаимодействии с атмосферным водяным паром, а также поверхностной кристаллизацией [1-3].

Влияние скорости охлаждения ( $v_{охл}$ ) при термообработке на воздухе при  $380^\circ\text{C}$  с длительностью изотермической выдержки 10 мин на распределение намагниченности и максимальную магнитную проницаемость ( $\mu_{max}$ ) аморфного сплава Co-Fe-Ni-Cr-Si-B изучали на образцах в форме полос размерами  $100 \times 10 \times 0,022$  мм. Поскольку ТО может приводить к формированию состояний с разными знаками магнитострикции насыщения ( $\lambda_s$ ), а влияние индуцируемых при этом напряжений для разных состояний различно, знак  $\lambda_s$  после ТО определяли по влиянию растягивающих напряжений, индуцируемых при взаимодействии поверхности ленты с водой. Индуцируемые напряжения помимо плоского создают

анизотропное растяжение поперек оси ленты в ее плоскости из-за образования в этом направлении повышенной концентрации внедренных в поверхность атомов водорода и кислорода [1]. Из таблицы видно, что такие напряжения приводят к повышению объемных долей доменов с ортогональной ( $V_{\text{орт}}$ ) и планарной намагниченностью, ориентированной вдоль оси ленты ( $V_{180}$ ). Т.е. намагниченность под действием растягивающих напряжений переориентируется в направлении, перпендикулярное растяжению. Отсюда следует, что после термообработки формируется состояние с  $\lambda_s < 0$ . Анизотропия распределения намагниченности в плоскости ленты, характеризуемая отношением  $V_{180}/V_{90} = \eta$ , где  $V_{90}$  - объемная доля доменов с планарной намагниченностью, ориентированной поперек оси ленты возрастает, что является причиной повышения  $\mu_{\text{max}}$ .

Состояние ленты	$V_{\text{охл}}, ^\circ\text{C}/\text{мин}$	$\square_{\text{max}}$	$V_{\text{орт}}, \%$	$V_{180}, \%$	$V_{90}, \%$	$\eta$
ТО 380 $^\circ\text{C}$ , 10 мин	40	410000	7,2	55	38	1,5
Обработка поверхности водой		430000	14,0	79	6,6	12,0
ТО 380 $^\circ\text{C}$ , 10 мин	15	440000	6,0	76	18,0	4,2

В отличие от аморфных материалов с  $\lambda_s > 0$ , понижение скорости охлаждения в этом случае способствует некоторому увеличению  $\mu_{\text{max}}$  вследствие формирования состояния с меньшими значениями  $V_{\text{орт}}$  и большими значениями  $V_{180}$ . Это может быть связано с диффузионными процессами, протекающими на стадии охлаждения [3]. Уменьшения концентрации внедренных в поверхность ленты атомов способствует снижению плоского растяжения и  $V_{\text{орт}}$ , а растягивающие напряжения поперек оси ленты из-за образования повышенной концентрации внедренных атомов при температурах ниже точки Кюри приводят к увеличению  $V_{180}$ .

Список публикаций:

- [1] Скулкина Н. А., Иванов О. А., Степанова Е. А., Шубина Л. Н., Кузнецов П. А., Мазеева А. К. // ФММ. 2015. Т. 116. №. 12. С. 1242-1249  
[2] Скулкина Н. А., Иванов О. А., Степанова Е. А., Блинова О. В., Кузнецов П. А., Мазеева А. К. // ФММ. 2016. Т. 117. №. 10. С. 1015-1022.  
[3]. Скулкина Н. А., Иванов О. А., Павлова И. О., Минина О. А. // ФММ. 2015. Т. 116. №. 10. С. 1031.

## Динамика намагниченности деформированного магнитомягкого ферромагнетика

**Ермоленко Игорь Петрович**

*Волгоградский государственный университет*

*Лебедев Николай Геннадьевич, д.ф.-м.н.*

*[heavymetallwarrior@yandex.ru](mailto:heavymetallwarrior@yandex.ru)*

Современные познания в области ферромагнетизма ограничиваются изучением магнитных свойств конкретных веществ с различной микроструктурой [1], магнитной анизотропии [2], попытками математической формализации явления гистерезиса [3] и эффекта Виллари с применением Лагранжевого формализма [4]. Но большинство из существующих моделей достаточно нетривиальны для практического использования в магнитном структурном анализе различных материалов и не позволяют учитывать магнитную предысторию при решении обратной магнитостатической задачи.

Основной задачей является объяснение физической природы петли гистерезиса. Причиной нелинейных свойств ферромагнитных сред считается необратимость процессов вращения, торможение роста зародышей перемagnetничивания (инверсия) и особенности динамики доменных границ [5].

В предлагаемой работе модели гистерезиса применение математического формализма работ [1 – 4] упрощается условием малости намагниченности, когда эффект Виллари можно считать линейным, физически обоснованным предположением, что материал без напряжений, дефектов и нарушений микроструктуры является магнитомягким. Кроме того, построение самой модели магнитомягкого ферромагнетика основано на квантовом подходе в описании основных видов взаимодействий в веществе с использованием феноменологических гамильтонианов [5, 6, 11, 14, 15] и проведено на примере  $\alpha$ -Fe.

На основе метода эффективного гамильтониана в модели учтены зеемановская энергия, спин-орбитальное взаимодействие и взаимодействие с кристаллическим полем. В рамках представления Гейзенберга получены нелинейные уравнения движения для намагниченности и орбитального момента домена. Параметры нелинейных уравнений найдены из сравнения с экспериментальными данными по магнитной анизотропии железа. Решение нелинейных жестких уравнений, полученное численно методом Розенброка, без учета магнитного трения для одного домена возможно имеет характерный вид петли гистерезиса.